



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

STORM SHAPE AND DAMAGE OVER NON OVERTOPPED RUBBLE MOUND BREAKWATER

Trabajo realizado por:

Lluís Fernández Maza

Dirigido por:

Xavier Gironella i Cobos

Vicenç Gràcia Garcia

Tutor externo:

Lluís Via Estrem

Grado en:

Enginyeria d'Obres Públiques

Barcelona, 21 de Junio del 2016

Departamento de ingeniería civil y ambiental (DECA)

TRABAJO FINAL DE GRADO

AGRADECIMIENTOS

A los tutores, Xavier Gironella y Vicente Gracia, por confiar en mí para poder hacer este trabajo y su total disposición en todo momento para resolver las posibles dudas que fueron surgiendo.

A personal del laboratorio de ingeniería marítima, Andrea Marzeddu y a Quim que me ayudaron en todo momento en las pruebas del canal CIEMito

Resum

El treball s'emmarca en el projecte europeu Hydralab+ (contracte 261520) dins la Joint Research Access JRA1: Representing Climate change In Physical Experiments (RECIPE). En concret consisteix en aproximacions innovadores per representar la variabilitat i la inestabilitat en canals d'onatge. L'estudi de l'acció dels temporals sobre les estructures entre dins d'aquest projecte.

L'evolució d'un temporal en el mar al llarg del temps, està directament relacionat amb els paràmetres que afecten a la estabilitat del dic (Run-up, overtopping,...). És per això que és necessari l'estudi de metodologies que s'adaptin a aquest fenomen. Aquest fenomen sols ha estat fins ara analitzat analíticament i cal plantejar-lo en el camp del modelat físic.

Els objectius d'aquest treball són tres:

- Fer un estat del art de temporals sintètics que s'adaptin millor a les característiques d'un temporal real (en aquest cas del mar Mediterrani català).
- Dissenyar un experiment que ens permeti verificar si els temporals sintètics provoquen la mateixa evolució del dany que el temporal real seleccionat, sobre un dic on el seu mantell principal està format per cubs de formigó.
- Revisar la literatura que ens permeti: la millora de la selecció de l'àrid per a les diferents capes, la disposició dels cubs al mantell principal a partir del paràmetre packing density i noves formes de mesurar el dany de l'estructura.

El procediment emprat ha estat bàsicament la recerca d'informació relacionada amb el tema del treball, seleccionar els aspectes més rellevants i procedir posteriorment a l'aplicació en un model físic concret.

El model físic finalment seleccionat ha estat l'experiment proposat per van der Meer (1988) a un escala un 1/3 en el canal CIEMito. Haurà d'estar constituït per 782 cubs de 1,5cm de costat i una densitat de 2,23 g/cm³, un filtre format per àrids entre 6,3 i 9 mm i un nucli format per àrids de 3,55 a 6,3 mm. La geometria del dic presenta una berma d'àrids de 9,0 a 13,2 mm a peu de l'estructura, de 3,8 cm de longitud.

L'escala de treball respecte del temporal real és de 1/80 degut a la necessitat de que es produeixin averies en el dic, a que la fondària (sense escalar) sigui una profunditat comuna per el tipus d'estructura d'estudi i, per últim, que la alçada d'ona màxima no sigui un factor limitant.

Després de l'anàlisi dels temporals teòrics a partir del estat del art, s'ha prescindit del model EPS perquè no s'adapta correctament a la configuració especial del temporal real. El millor model teòric ha estat el ETMS amb dues configuracions, escalè i isòsceles, que han estat calculades per ser generades en el CIEMito.

Es suggereix el càlcul del dany a l'estructura a partir del model de Gómez-Martín i Medina (2014) que es basa en dividir en franges horitzontals l'estructura per considerar les diferències de porositat al llarg del talús. Posteriorment s'obté l'averia a cadascuna de les franges per després sumar-les i obtenir el dany total.

El treball realitzat porta a les següents recomanacions de cara a la propera realització dels assaigs

- Control exhaustiu de l'elaboració dels cubs de morter per a que tinguin una determinada densitat el mes propera possible a 2,23 g/cm³.
- La mesura del dany de l'estructura s'ha de realitzar a partir de les propostes de Gómez-Martín i Medina (2014), doncs la porositat varia amb l'evolució del dany.

Paraules clau: dic, temporal, model físic, bloc de morter, dany.

Abstract

The project is defined in the European project Hydralab+, (number 261520) within the Joint Research Access JRA1: Representing Climate change In Physical Experiments (RECIPE). Specifically it consists in innovative approaches for representing variability and unsteadiness in flume facilities. The study of storms actions over the structures is within this project.

The time evolution of the storm in the sea is directly related to the parameters that affect to the unsteadiness of the breakwater (Run-up, overtopping...). That is why therefore it is necessary to study the methodologies adapted to this phenomenon. This phenomenon has only been studied analytically and it's necessary to consider the field of physical model as well.

The aims of the work are three:

- Do a state of the art of synthetic storms which adapt better to the characteristic of real storm (In this case the Mediterranean sea).
- Design an experiment that allow us verify if the synthetic storms, cause the same evolution of the damage that the selected storm over the breakwater, which armour layer is composed for cubes of concrete.
- Review of the literature that allow us: the improvement of the selection of the gravel for the different layers, the placement of the cubes to the armour layer from the parameter packing density and new methods to measure the damage of the structure.

The procedure basically, is the research of information related to the topics of project and select the more relevant aspects in order to proceed latter to their applicability in a specific physical model.

The selected physical model has been the experiment proposed by van der Meer (1988) scaled in a 1/3 in the CIEMito flume. It must be composed for 782 cubes of 1,5 cm side and a density of 2,23 g/cm³, a filter formed by gravel between 6,3 and 9 mm and a core formed by gravel of 3,55 to 6,3 mm. The breakwater geometry presents a berm of gravel of 9,0 to 13,2 mm. at the toe of the structure with 3,8 cm of length.

The scale of work respect to the real storm is 1/80, due to the need to induce damage in the breakwater, to have a common depth (unscaled) for the type of studied structure and because of the maximum wave height was not a limiting factor.

After the application of the theoretical storms which have been chosen from the state of the art, it has been discarded the model EPS because it does not fit properly the special configuration of the real storm. The best theoretical model has been the ETMS with two configurations, scalene and isosceles, which have been calculated to be generated in the CIEMito.

It is suggested that the calculation of damage at the structure follows the method proposed by Gómez-Martín and Medina (2014). This method is based on dividing the structure in horizontal bands to consider the differences in porosity along the slope. Afterwards the damage in each of the bands is obtained and the total damage is calculated joining them.

The work realised leads to the following recommendations:

- Exhaustive control of the preparation of the cubes to obtain a determined density as close as possible to 2,23 g/cm³
- To measure the damage of the structure following the method proposed by Gómez-Martín and Medina (2014) because the porosity change with the evolution of damage.

Keywords: breakwater, storm, physical model, concrete bloc, damage.

ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN.....	1
I-1.	Antecedentes	1
I-2.	Objetivos	2
II.	EXPERIMENTAL SET-UP	3
II-1.	Canal CIEMito	3
II-1-a.	Generación de oleaje	4
II-1-b.	Datos obtenidos	5
II-2.	Estructura.....	6
II-2-a.	Geometría	6
II-2-b.	Dimensionamiento	7
II-2-c.	Elección material manto principal y colocación	10
II-3.	Elección de la escala de trabajo	11
II-3-a.	Escalado.....	12
II-3-b.	Problemas del escalado.....	12
II-4.	Tormentas.....	13
II-4-a.	Introducción tormentas sintéticos.....	13
II-4-b.	Aplicación de los Modelos teóricos	16
II-4-c.	Tormenta real.....	20
II-5.	Daño	22
II-5-a.	Concepto de daño en obras marítimas	22
II-5-b.	Método para medir el daño.....	22
III.	PROPUESTA DE EJECUCIÓN Y TOMA DE DATOS.	23
IV.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	24
V.	FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	26
VI.	REFERENCIAS	27
VII.	NOMENCLATURA Y SIMBOLOGIA	29

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Fotografía canal CIEMito	3
Ilustración 2. Tipos de rotura del oleaje según Iribarren	3
Ilustración 3. Esquema Pala-pistón	4
Ilustración 4. Curva de capacidades del CIEMito (h=30 cm)	5
Ilustración 5. Izquierda, fotografía pala-pistón y a la derecha sensores de capacidad...	6
Ilustración 6. Estructura de van der Meer 1988b.....	6
Ilustración 7. Estructura de estudio	7
Ilustración 8. Relación Peso por elemento con Diámetro de tamiz.....	8
Ilustración 9. Fotografía donde se puede ver las capas del manto principal	11
Ilustración 10. Derecha: fotografía inicial de la prueba, Izquierda: fotografía final de la prueba donde se pueden ver los dos tipos de daño.....	13
Ilustración 11. Ejemplo del perfil de la tormenta de diseño por Owen & Allsop (1983). 14	
Ilustración 12. Esquema ETS, obtenido de Martín-Hidalgo, M. 2014	15
Ilustración 13. Esquema del modelo ETMS (Martín-Hidalgo et al., 2014)	16
Ilustración 14. Esquema del modelo ETNWS (Martín-Hidalgo et al., 2014)	16
Ilustración 15. Representación modelo Boccotti a partir de la tormenta real.	18
Ilustración 16. Representación del modelo ETMS triangular isósceles.....	19
Ilustración 17. Representación del modelo ETMS triangular escaleno	19
Ilustración 18. Tormenta de diciembre de 2008, datos obtenidos de la boya de Blanes	20
Ilustración 19. Altimetría obtenida de Navionics WebbApp	21
Ilustración 20. Perfil usado para el SWANOne.....	21
Ilustración 21. Izquierda Introducción de datos al SWANOne, derecha esquema de las componentes.....	21

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Graduación del material según CIRIA/CUR tabla 3.5	8
Tabla 2. Diámetro de los tamices requeridos.	9
Tabla 3. Dosificación del hormigón.....	10
Tabla 4. Valores λ , a partir de la similitud de Froude.	12
Tabla 5. Comparativa de los diferentes modelos teóricos para cada propuesta de periodo	17
Tabla 6. Comparativa de las posibles formas por cada modelo teórico	17
Tabla 7. Niveles de N_{od} para diferentes tipos de manto principal (2 capas) (tabla VI-5-21 CEM)	22

I. INTRODUCCIÓN

I-1. Antecedentes

El trabajo final de grado se enmarca en el proyecto europeo Hydralab+, (número de contrato: 261520), tiene como objetivo principal: fortalecer la coherencia de la investigación experimental hidráulica a partir de la mejora de las infraestructuras que participan no solo con el objetivo de progresar en la disciplina sino que también para adaptarlas a los problemas que pueda causar el cambio climático. El estudio se corresponde con en la *tarea 8.2 “Aproximaciones innovadoras para la representación la variabilidad y la inestabilidad en canales”* que tiene como objetivo propio desarrollar nuevos protocolos y ensayos sobre modelos físicos que sean capaces de reproducir la variabilidad y la inestabilidad asociada a los eventos extremos que causaría el cambio climático para posteriormente poder planificar estrategias para poder anticipar y mitigar las consecuencias de estos.

Debido a la imposibilidad de disponer de la evolución de tormentas reales con un periodo de retorno fijo, y de la importante relación entre la evolución de la tormenta y la evolución de la avería. Provoca la necesidad del uso de modelos teóricos que se adapten a las características de las tormentas en zonas geográficas concretas (nivel de desarrollo del mar) y que sean fácilmente aplicables a partir de parámetros básicos como la H_{spico} , duración o número de olas.

Para la elección de los modelos y de su forma se ha tomado de referencia los artículos de Hidalgo, M. et al. (2014) e Hidalgo, M. et al. (2015), respectivamente, estos artículos comparan diferentes modelos a partir de cálculo **analítico** que causarían sobre una estructura. Los dos modelos más representativos para el punto SIMAR 2083039 (Mediterráneo), son el EPS y el ETMS, aplicando a este último modelo teórico tanto la forma triangular isósceles como la forma triangular escaleno ya que en el segundo artículo se menciona que los resultados tendrían de ser iguales. Estos modelos se basarán en los datos obtenidos en la boya que formaba parte de la XIOM que nos permite saber la altura de ola, el periodo y la dirección del oleaje, que se localizaba en Blanes (41°38,81'N 2°48,93'E a 74m de profundidad) durante la tormenta de diciembre de 2008.

Para conseguir unos resultados realistas, será necesario hacer una representación de una construcción del dique “realista”, por lo que se ha buscado en la literatura, la elección de los materiales para la elaboración de los cubos, la elección de la forma de su colocación. También se ha profundizado sobre al proceso de cribar el material granular presente en el laboratorio y se ha estudiado los posibles problemas que puede causar el escalado, intentando poner medidas para paliar los efectos negativos que puedan suceder y por último nuevas la búsqueda de nuevas formas de poder calcular el daño en la estructura que no dependan exclusivamente de la definición de daño según la fórmula de van der Meer.

I-2. Objetivos

Este trabajo tiene como primer objetivo diseñar un experimento que nos permita poder verificar si los oleajes sintéticos (modelo teórico) causan la misma evolución del daño que una tormenta real en el Mediterráneo (Blanes) sobre una estructura en talud con un manto principal formado por cubos. Este objetivo se enmarca en el proyecto europeo Hydralab+ contract number 261520.

El segundo objetivo es hacer un estado del arte de oleajes sintéticos para encontrar aquellos modelos teóricos y su forma (triangular, parábola, trapezoidal,...) cuya evolución del daño, calculado de forma analítica, sea semejante a una tormenta real característica de la zona del Mediterráneo y aplicar aquellos modelos teóricos que mejor se adapten a partir de la tormenta real de diciembre de 2008.

El tercero objetivo es una revisión de la literatura que ayude en los procesos elección del material de los cubos y su disposición en el manto principal, la selección del material granular para que la construcción se parezca a una construcción real y por ultimo nuevas formas de calcular el daño que produce el oleaje a partir de nuevos parámetros.

II. EXPERIMENTAL SET-UP

II-1. Canal CIEMito

La figura 1 muestra el canal CIEMito que se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) sobre el cual se ha diseñado el estudio de la evolución del daño en un dique en talud no rebasable, con el manto principal hecho a partir de cubos de hormigón. Las medidas del canal son 18 m de longitud, 0,38 m de anchura y 0,56 m de profundidad con un calado máximo de 0,36 m.



Ilustración 1. Fotografía canal CIEMito

En el que se le añadió una pendiente 1:15 delante de la estructura a partir de tablas regulables, con el objetivo de peraltar la ola y por lo tanto que la rotura de la ola se parezca más a una rotura plunging que a una spilling. El sistema de llenado y vaciado, consta de dos pozos de 0,20 m de diámetro situados en los extremos del canal aparte de un depósito de 3 m³ de capacidad.

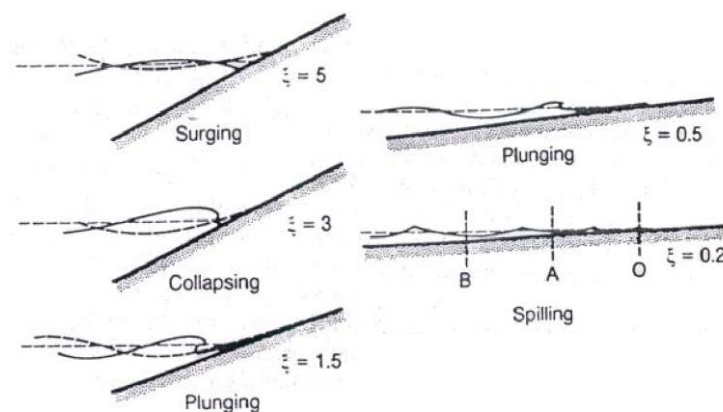


Ilustración 2. Tipos de rotura del oleaje según Iribarren

II-1-a. Generación de oleaje

La generación de oleaje en el canal se hizo a partir de una pala tipo pistón, figura 3.

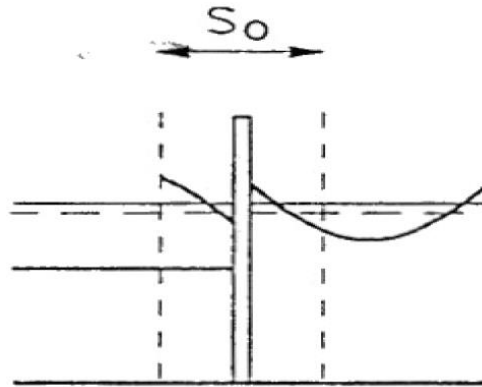


Ilustración 3. Esquema Pala-pistón

La generación del oleaje viene limitado por muchos factores, velocidad máxima del piston, profundidad en la pala,... pero los tres factores más relevantes son: el primero es la carrera máxima de la pala de la infraestructura (eq. 1), S_o , la pala del CIEMito tiene una carrera máxima de 50 cm, aunque para cálculos se limitará a 45 cm.

$$H = S_o \frac{2 * (\cosh(2 * k * h) - 1)}{\sinh(2 * k * h) + 2 * k * h} = \frac{4 \sinh^2(k * h)}{\sinh(2 * k * h) + 2 * k * h} \approx S_o * k * h \quad (1)$$

El segundo factor es el peralte máximo, s , que es la relación entre altura de la ola y la longitud. La infraestructura permite generar un peralte máximo de $H/L_o=1/7$ pero para dejar un margen, no habrá ningún oleaje con un peralte superior a 0,1. La tercera y última limitación del oleaje es la altura máxima, esta altura de ola corresponde con una relación entre la altura de ola en un punto y la profundidad de este, donde $\gamma ()$ tomará un valor de 0,65.

$$\frac{H}{h} = \gamma = 0,65$$

Con las tres limitaciones se hizo una curva capacidades, esta representa la mínima altura de ola posible para cada periodo, fig 4. Esto nos indica que el oleaje posible se encuentra en el área encerrada por la curva de capacidades.

El software usado para la generación del oleaje, CIEMgen versión 1.02, ha sido desarrollado por la misma universidad (UPC).

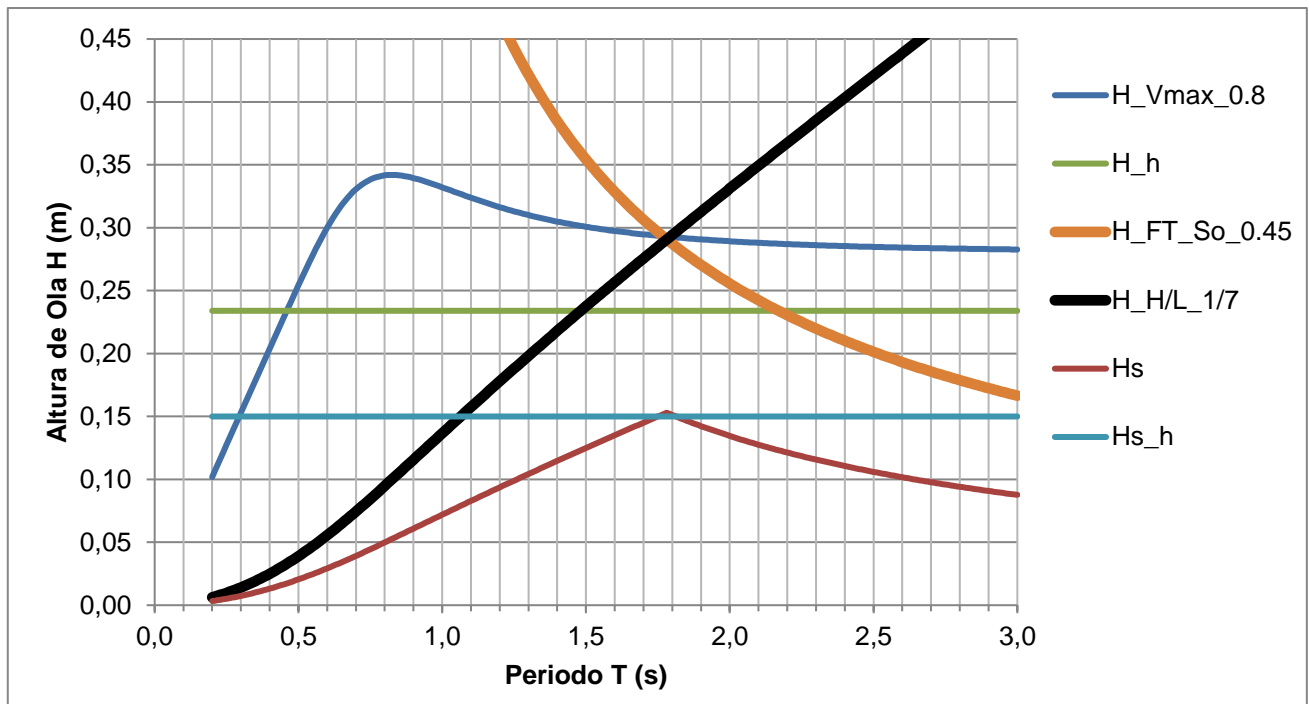


Ilustración 4. Curva de capacidades del CIEMito (h=30 cm)

II-1-b. Datos obtenidos

Para comprobar que las olas que ha generada la pala se asemejan a las olas demandadas se hará uso de sondas de resistencia de HR Wallingford, figura 5. El funcionamiento de estas sondas se basa en la ley d'Ohm.

$$V = I * R$$

Entre las barillas pasa una intensidad constante y las sondas miden la diferencia de voltaje, esta diferencia varía según la resistencia que provoca el agua y esta resistencia es proporcional a la profundidad por debajo de la lamina de agua. Por lo que a partir de dos profundidades conocidas, se puede saber la altura de la lamina del agua y por lo tanto se puede medir las olas.

Estos sensores obligan a calibrarlos cada vez que se llene el canal ya que si varía la salinidad del agua, esta puede producir diferencias de calculo de la altura.

El software que se usará para la captación de datos será el Wavelab, que ha sido desarrollado por la Universidad de Aalborg, este software permite una capacidad de hasta 32 canales (sondas) de los cuales solo se utilizarán 11.

Una vez se han obtenido los datos de las sondas, estos se presentan en forma voltaje por lo que será necesario un programa que nos permita la conversión a archivos que sean leíbles en formato .txt, este programa será el WafaLIM 1.2, ya que al tratar con oleaje irregular, este software nos permitirá saber los valores espectrales de la muestra como el H_{m0} o el T_p y comparar-los con los valores aportados en el CIEMgen.



Ilustración 5. Izquierda, fotografía pala-pistón y a la derecha sensores de capacidad

II-2. Estructura

II-2-a. Geometría

La estructura de la fig 7, será un escalado de una tercera parte del experimento de van der Meer (1988b). Fig 6.

La estructura tiene una anchura de la base de 0,75 m y una anchura de la cresta de 0,13 m. La distancia entre la cresta y la base es de 0,21 m. La estructura consta de dos capas, el manto principal con $M_{50} = 7,53$ g y una densidad de $\rho = 2,26$ g/cm³ con lo que el diámetro nominal $D_{50} = 1,5$ cm, calculado a partir de la fórmula $D_{50} = (M_{50}/\rho)^{1/3}$, y un filtro con un $M_{50} = 0,84$ g, una $\rho = 2,65$ g/cm³ y un $D_{50} = 0,7$ cm, además tiene un núcleo con un $M_{50} = 0,079$ g y con pendiente a ambos lados de 1:1,5.

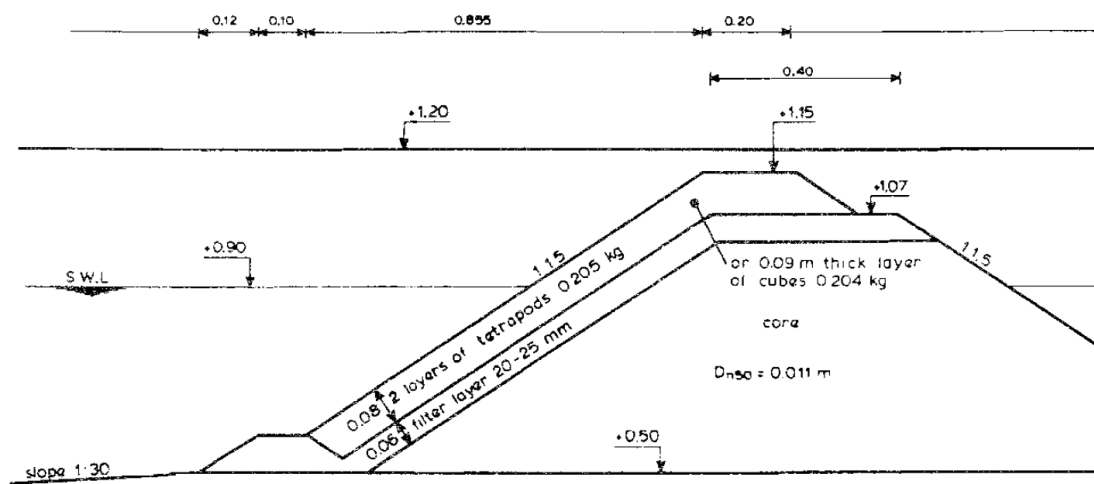


Ilustración 6. Estructura de van der Meer 1988b

prestados por el departamento de geotecnia, que permitió relacionar el peso por elemento medio, con los tamices en los que se encuentra fig 8.

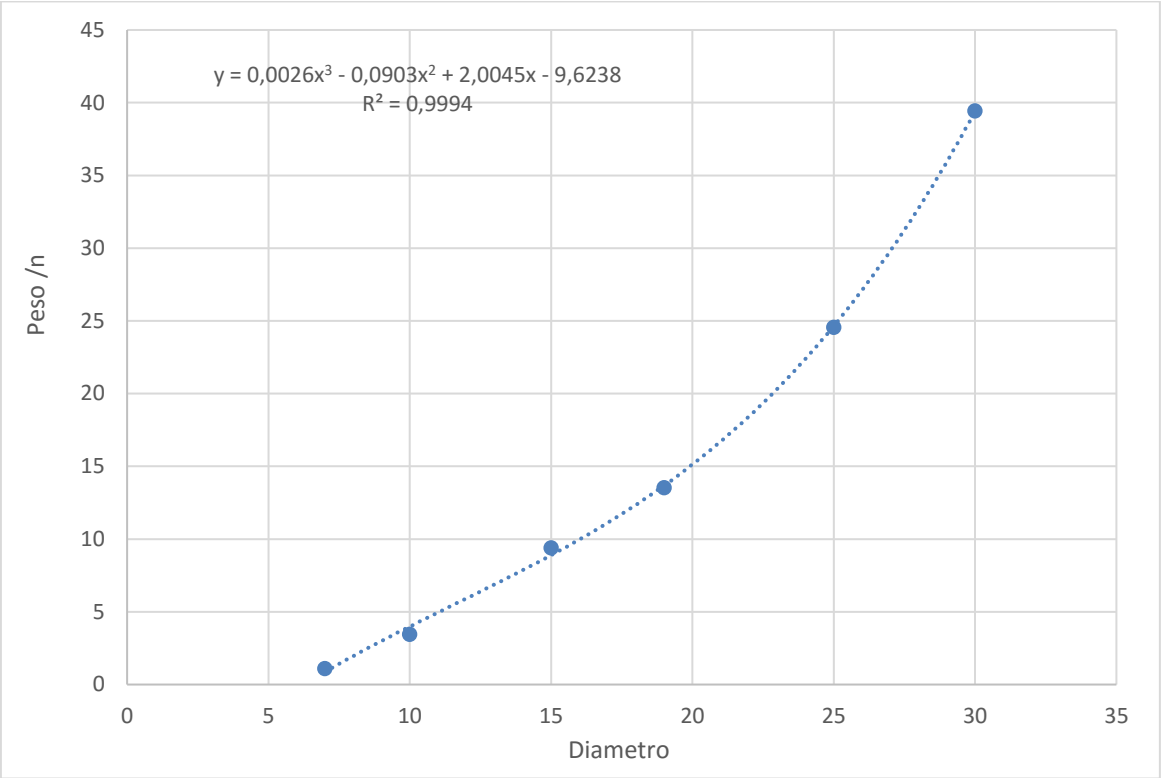


Ilustración 8. Relación Peso por elemento con Diámetro de tamiz

Como se ha dicho anteriormente, el objetivo de este estudio es la verosimilitud de la construcción. Por lo que una cantera real no te ofrece un peso concreto sino que te ofrece unas horquillas representadas en la tabla 1.

Heavy	Class designation
	Passing requirements kg
	10 000–15 000
	6000–10 000
	3000–6000
	1000–3000
	300–1000
Light	Class designation
	Passing requirements kg
	60–300
	10–60
	40–200
	5–40
	15–300 *

Tabla 1. Graduación del material según CIRIA/CUR tabla 3.5

Por lo que se tuvo que escalar estas horquillas para hacer una equivalencia entre el peso requerido en la estructura y el que te podría ofrecer una cantera. Por lo que se proponen los tamices normalizados de 6,30 a 9,00 para el filtro, de 3,55 mm a 6,30 mm para el núcleo y de 9,00 mm a 13,20 mm para la berma de ISO-ASTM

Peso real (Kg)		Peso escalado (g)		Diámetro tamices (mm)		ISO – ASTM (mm)	
>	10000	x	19,53	x	19,46		19,00
6000	10000	11,72	19,53	16,41	19,46	16,00	19,00
3000	6000	5,86	11,72	13,03	16,41	13,20	16,00
1000	3000	1,95	5,86	9,03	13,03	9,00	13,20
300	1000	0,59	1,95	6,05	9,03	6,30	9,00
60,00	300	0,12	0,59	3,54	6,05	3,55	6,30

Tabla 2. Diámetro de los tamices requeridos.

Una vez hecho el tamizaje de la muestra se recomienda prescindir de aquel material que sea de forma redondeada ya que provocaría una disminución de la fricción entre capas, sobre todo entre filtro y manto principal, con el objetivo de reducir el efecto del "adoquinamiento", Medina J.R 2014, del manto principal

El segundo proceso para profundizar sobre el diseño consiste en hacer una corrección sobre el tamaño del material del núcleo, esta corrección es necesaria porque al escalar el tamaño del material no se mantiene la relación entre porosidades del modelo a la realidad. Esto causa, como se ha dicho anteriormente, un aumento de la cantidad de agua en la parte del manto principal, lo que hace aumentar parámetros como el Run-up, Run-down y overtopping.

Para la obtención del parámetro se propone seguir los pasos expuestos en el artículo de Martín, F. et al 2002, en éste, se exponen los siguientes puntos para poder obtener el factor de corrección del núcleo.

1. Calcular el coeficiente de transmisión a través del dique, a partir del uso de las fórmulas de Numata modificado.

$$K_t = \frac{1}{\left(1 + \frac{\alpha_t}{I_r}\right)^2}; \quad \alpha_t = 0.54 \left(\frac{B}{D_{50}}\right)^{0.66} \quad for \quad 50 < \frac{B}{D_{50}} < 100$$

2. Calcular $U_t(z)$ en las dos alturas de los 4 puntos a partir de la siguiente formula.

$$U_t(z) = \frac{\pi K_t H i}{\sqrt{2} T} * \frac{\sqrt{\cosh 2k(h+z)}}{\sinh kh}$$

3. Calcular la velocidad en los 4 puntos de control.

$$\frac{U(x,z)}{U_t(z)} = (0.05 + 0.95a) \left[(1-a)e^{-\frac{3x}{B}} + a \right]$$

$$a = -0.437 \frac{B}{L} + 0.318$$

4. Hacer una media de las velocidades U_{rms} , ya que solo ha de haber un factor de corrección.
5. A partir de la velocidad media, de los cuatro puntos de control se encontrara el escalado con el uso del método planteado por Jensen & Klinting, 1983, que dependerá del número de Reynolds.

Para la comprobación de las velocidades dentro del núcleo, se podrían calcular a partir de modelos VOF, que como se explica en el artículo, ofrece buenas aproximaciones a los números reales.

II-2-c. Elección material manto principal y colocación

Se estudió la posibilidad de tratar que el material que formaba el manto principal no fuera hormigón debido a posibles problemas que pudiera causar, tales como disolución, problemas de porosidad, etc. y por lo tanto se buscó otros materiales.

El primero fue el uso de resinas pero debido al precio y a que con dificultad se llegaría a la densidad requerida por sí misma y se tendría de añadir limaduras de hierro u otras materiales de alta densidad. La segunda opción fue el uso de yeso cristalino, esta opción vino de una recomendación de HR Wallingford, ya que esta empresa lo usaba con frecuencia, pero igual que la resina presentaba problemas de densidad, aparte la solubilidad del material era superior a la del hormigón, por lo que se tendría de haber comprado polímeros para hacer un material hidrofóbico, lo que encarecía el proyecto, por lo que al final se optó por hacerlos de hormigón.

Finalmente el hormigón fue dosificado, tabla 3, y elaborado por el laboratorio de estructuras del Campus Nord.

	Masa (g)	Densidad (Kg/m3)	Volumen (m3)
Agua	90,00	1000,00	9,00E-05
Cemento	200,00	3100,00	6,45E-05
Arena (0.3 mm)	450,00	2600,00	1,73E-04

Tabla 3. Dosificación del hormigón

Se optó también por pigmentar los elementos para que a la hora de hacer una fotografía o incluso visualmente se viera con más contraste la diferencia de capas y por lo tanto facilitar el proceso de medición de la avería fig 9.



Ilustración 9. Fotografía donde se puede ver las capas del manto principal

Una vez elegido el material con el que se construirán los cubos de 1,5 cm de lado, se ha de elegir la forma de colocación, estos podrían ser colocados sin ninguna orientación prefijada (aleatoria) o con una orientación fijada (regular), la elección influirá directamente en la porosidad del manto principal, ya que al colocar los cubos, estos tienden a colocarse cara contra cara con lo que puede crearse diferencias de porosidad en una misma capa del manto principal y por lo tanto, un aumento de la inestabilidad en esas partes donde hay más porosidad.

En la realidad, la colocación de estas piezas es aleatoria y esto provoca que a veces sea difícil calcular esa aleatoriedad, lo que puede provocar a veces excesos de material que conlleva a un gasto económico innecesario, es por esto que en el diseño del dique de estudio también se ha elegido la forma de colocación aleatoria, pero en el estudio sí que se ha tenido en cuenta la aleatoriedad, obteniendo los parámetros de las unidades necesarias para formar el dique por unidad de área ($\phi=5200$ unidades/m²) y de la porosidad final ($P=0,47$), imponiendo previamente el parámetro adimensional de colocación, packing density ($\phi=1,17$), que es el valor recomendado por los manuales de ingeniería CIRIA/CUR 2007 (Herrera M.P et al 2015). Aplicando estos valores a la instalación CIEMito y a la escala de trabajo, implica el uso de un total de 782 bloques de 1,5cm de lado y densidad 2.23 gr/cm³.

II-3. Elección de la escala de trabajo

La elección de la escala de trabajo depende de tres factores, el primero que se produzca una evolución del daño sobre la estructura, es por esto que se ha hecho un barrido de escalas (Se adjunta en el Anejo) donde se puede ver que la escala 1/80, es la mayor escala que produce daño según la fórmula de van der Meer. El segundo factor es que la escala seleccionada hace que la profundidad en la que se encuentra el pie de la estructura sea un valor común para un dique en talud con el manto principal formado por cubos y el tercero es que la profundidad nos permita tener oleaje no rompiente (limitaciones por fondo) sobre la estructura.

II-3-a. Escalado

Los criterios usados para el escalado geométrico del proyecto corresponden al criterio de Froude ya que consideraremos que la fuerza predominante es la fuerza de la gravedad.

$$\frac{U_m}{\sqrt{g \cdot L_m}} = \frac{U_p}{\sqrt{g \cdot L_p}} \rightarrow U_p = U_m \cdot \sqrt{\frac{L_p}{L_m}} \rightarrow \frac{L_p}{L_m} = \lambda \rightarrow U_p = U_m \cdot \sqrt{\lambda}$$

A partir de la anterior relación (λ) podemos obtener, la relación de los tres parámetros que definen cualquier unidad física, longitud (L), tiempo (T) y masa (M). En la tabla 4. Se resumen las relaciones de diferentes parámetros, entre el modelo y el prototipo.

Parámetro	Similitud Froude
Tiempo	$\lambda^{1/2}$
Masa	λ^3
Velocidad	$\lambda^{1/2}$
Aceleración	1
Fuerza	λ^3
Presión	λ
Energía	λ^4

Tabla 4. Valores λ , a partir de la similitud de Froude.

La estructura de estudio, no tuvo distorsión geométrica por lo que la relación entre las distancias reales y del modelo, se mantienen constantes.

$$K = \frac{x_M}{x_P} = \frac{y_M}{y_P} = \frac{z_M}{z_P}$$

Donde los subíndices M y P, corresponden respectivamente a Modelo y Prototipo.

II-3-b. Problemas del escalado

El primer problema del escalado es que el escalado geométrico de los materiales hace que la relación de porosidad global no se mantenga, por lo que los fenómenos físicos que intervienen en la avería como el Run-up, Run-down o el overtopping se ven modificados, respecto a lo que realmente serían. El segundo problema del escalado es la correcta densidad del hormigón con el que están hechos los cubos. La densidad no se escala, pero al hacer los experimentos en agua dulce se ha de mantener la relación de densidades.

$$\frac{\rho_{\text{hormigón real}}}{\rho_{\text{agua salada}}} = \frac{\rho_{\text{hormigón experimento}}}{\rho_{\text{agua dulce}}}$$

Y el no hacerlo bien afecta en la estabilidad haciéndolo más o menos flotable. Por último, el tercer problema es la densidad de colocación, debido a la alta porosidad provoca que los cubos no salgan del manto principal sino que se recolquen formando “adoquinamiento”, es decir una diferencia de porosidad en zonas concretas lo que hace

disminuir la porosidad en la zona menos densa, por lo que será necesario tener en cuenta este factor a la hora de calcular el daño final de la estructura.



Ilustración 10. Derecha: fotografía inicial de la prueba, Izquierda: fotografía final de la prueba donde se pueden ver los dos tipos de daño

II-4. Tormentas

II-4-a. Introducción tormentas sintéticas.

Ningún ensayo sobre modelo físico se ha llevado a cabo usando la evolución de una tormenta de diseño, real y registrada porque estos datos no están disponibles en la fase de diseño ya que es difícil buscar una tormenta real que se adecue a un periodo de retorno determinado, pero los daños, como la estabilidad o el overtopping están estrechamente ligados con la evolución de la tormenta, por lo que es necesario el estudio de esta para poder analizarlos por lo que se ha de emplear tormentas sintéticas que se adapten a la tormenta real.

A partir del artículo de Martín-Hidalgo, M. et al 2014 se extrae la información de las siguientes tormentas sintéticas:

- Equivalent Power Storm model (EPS)
- Equivalent Triangle Duration Storm (ETDS)
- Equivalent Triangle Magnitude Storm model (ETMS)
- Equivalent Triangle Number of Waves Storm model (ETNWS)

Si se tiene una cantidad de información importante, es posible crear tormentas sintéticas. Por ejemplo, Owen y Allsop (1983), propusieron obtener el perfil de la tormenta sintética a partir de los datos disponibles dentro de un tiempo registrado cuya

altura de la ola más alta fuera alrededor del 70% de la altura de ola de diseño. Figura 11.

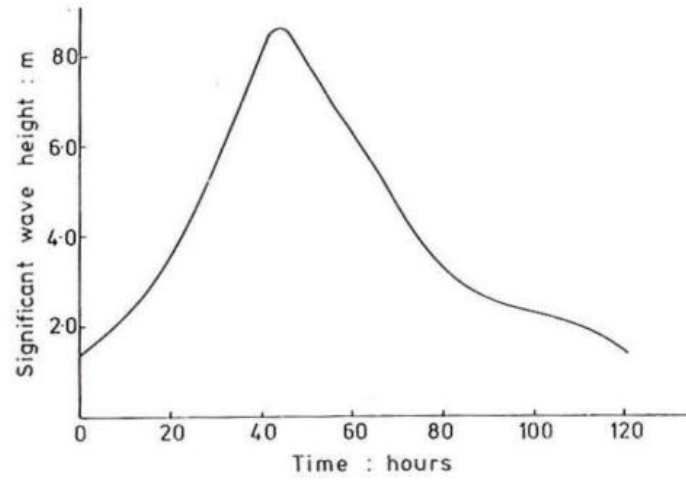


Ilustración 11. Ejemplo del perfil de la tormenta de diseño por Owen & Allsop (1983)

Equivalent Power Storm model (EPS)

El primer modelo será el propuesto por Fedele y Arena (2009), que corresponde con una generalización del modelo propuesto por Boccotti (2000), con la incorporación del parámetro de forma λ , siendo el modelo de Boccotti cuando tiene un valor igual a 1.

$$H_{max} = \int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \int_0^{D_{real}} \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} dt \right\} dH$$

$$H_{max} = \int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \frac{b}{\lambda a} \int_0^a \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} \left(1 - \frac{h}{a}\right)^{\frac{1}{\lambda}-1} dh \right\} dH$$

$$P(H: H_s = h(t)) = \exp \left[-\frac{4H^2}{(H_s^2(1 + \psi))} \right]$$

El parámetro ψ depende del nivel de desarrollo del mar de estudio, que tiene valores entre $0,65 < \psi < 0,75$ por ser el Mediterráneo un mar de viento, siendo 0,71 para los cálculos, el parámetro “a” es igual a la altura pico de la tormenta, y el parámetro b es la base del modelo (duración), tal que la máxima altura de la ola esperada del modelo, corresponde con la altura de ola máxima de la tormenta real, por lo que la b se encuentra a partir de un proceso iterativo. Cuando la ecuación X y la ecuación X coinciden.

$$\int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \int_0^{D_{real}} \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} dt \right\} dH = \int_0^{\infty} 1 - \exp \left\{ \frac{b}{\lambda a} \int_0^a \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} \left(1 - \frac{h}{a}\right)^{\frac{1}{\lambda}-1} dh \right\} dH$$

O lo que es lo mismo, que:

$$\int_0^{D_{real}} \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} dt = \frac{b}{\lambda a} \int_0^a \frac{\ln[1 - P(H: H_s = h(t))]}{T_m[h(t)]} \left(1 - \frac{h}{a}\right)^{\frac{1}{\lambda}-1} dh$$

La altura equivalente vendrá dada por la diferencia entre la altura de ola pico y la altura de ola mínima para que sea considerada tormenta, en nuestro caso 2m, según R.O.M 1.0-09.

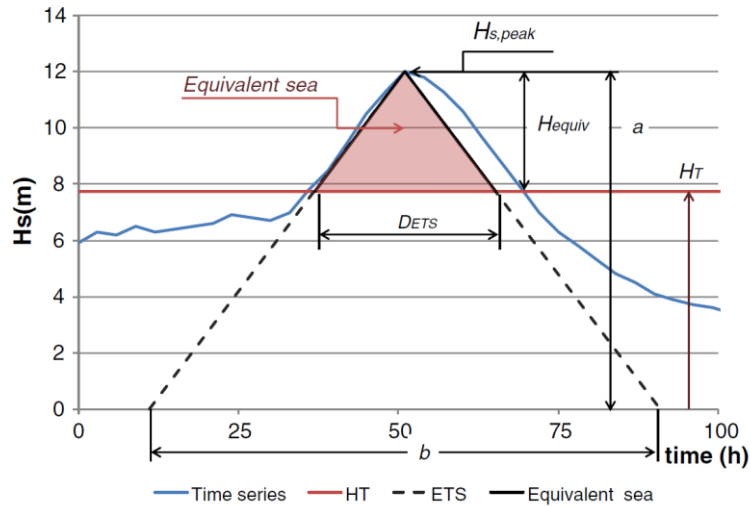


Ilustración 12. Esquema ETS, obtenido de Martín-Hidalgo, M. 2014

Equivalent triangle Duration Storm (ETDS)

Este modelo está propuesto por Corbella y Stretch, 2012a, una forma triangular de altura equivalente, H_{equiv} , y base D . La duración asociada al tiempo real que se encuentra por encima del umbral, (altura de ola H_T)

Equivalent triangle Magnitude Storm model (ETMS)

El ETMS está basado en el concepto de De Michele et al. (2007), la magnitud de la tormenta (área que describe la tormenta por encima del umbral de la zona descrito en la R.O.M 0.1-09), en este modelo la altura del triángulo viene determinada por la H_{equiv} y la base, D_{equiv} es aquella que su magnitud igual a la tormenta real.

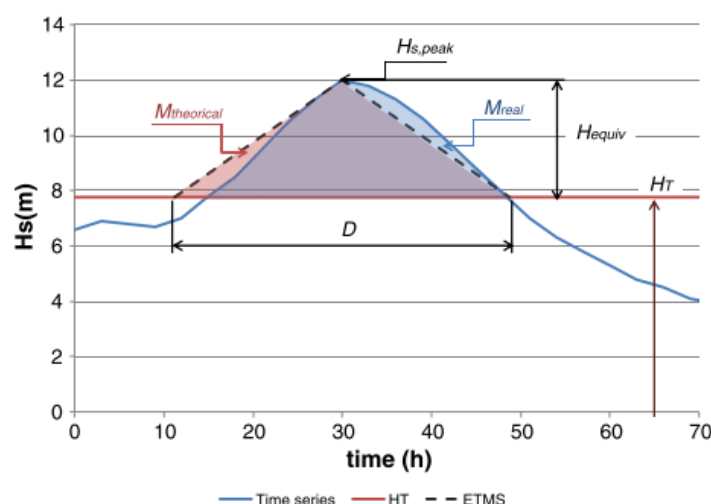


Ilustración 13. Esquema del modelo ETMS (Martín-Hidalgo et al., 2014)

Equivalent Triangle Number of Waves Storm, (ETNWS)

Otra aproximación descrita en el artículo es el ETNWS, está definida en términos de altura de ola equivalente, H_{equiv} , y por el número de olas, N_z , que definen la base del triángulo.

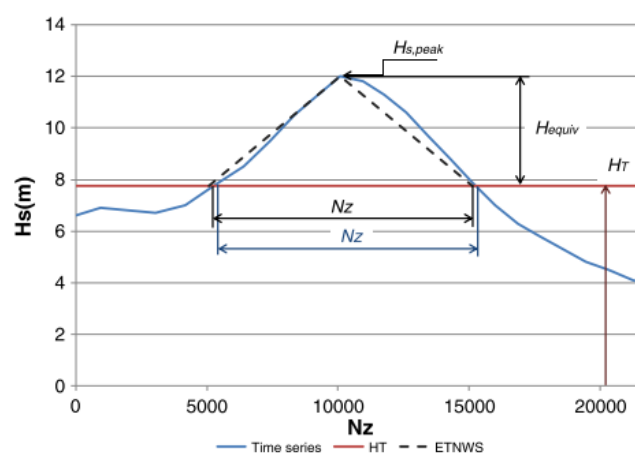


Ilustración 14. Esquema del modelo ETNWS (Martín-Hidalgo et al., 2014)

II-4-b. Aplicación de los Modelos teóricos

Se hará la aplicación de tres modelos teóricos, el primer modelo corresponde al EPS, que corresponde con el modelo de Boccotti 2000 cuando $\lambda=1$, el segundo es el ETMS, con forma triangular Isósceles, y el tercero es el ETMS pero con una forma triangular escaleno, son aquellos modelos que según Martín-Hidalgo, M., et al, 2014 reproducen mejor de forma analítica la progresión del daño que causan en las estructuras marítimas. En el primer modelo reproduce bien la progresión del daño en las estructuras en zonas donde hay mar de viento como es el caso del Mar mediterráneo y en el segundo modelo que puede dar buenos resultados tanto en un mar desarrollado como en una de viento. Tabla 5 obtenida del mismo artículo.

Theoretical storm	T_m approach	SIMAR-1042072	SIMAR-2083039
ETS	Rice	0.8681	0.9661
EPS $\lambda = 0.75$	Rice	0.8448	0.6778
EPS $\lambda = 2$	Rice	0.3143	a)
ETDS	Martín	0.9516	0.9687
	Torsethaugen II-III	0.9684	0.9665
	Torsethaugen I-II	0.9013	0.9518
	Rice	0.9265	0.9697
ETMS	Martín	0.9846	0.9907
	Torsethaugen II-III	0.9911	0.9722
	Torsethaugen I-II	0.9506	0.9781
	Rice	0.9691	0.9913
ETNWS	Martín	0.9512	0.9700
	Torsethaugen II-III	0.9756	0.8405
	Torsethaugen I-II	0.8115	0.9404
	Rice	0.8864	0.9693

a)Uncorrelated.

Tabla 5. Comparativa de los diferentes modelos teóricos para cada propuesta de periodo

Para la elección de la forma de las tormentas sintéticas se basa en el artículo de Martín-Hidalgo, M., et al, 2015, los resultados se recogen la tabla 6 obtenida del mismo artículo. A partir de las conclusiones, de este mismo artículo se deduce que la forma trapezoidal es la que mejor reproduce una tormenta del Mediterráneo pero debido a que la diferencia es mínima con la de la forma triangular, tanto escaleno como isósceles, se escogió la forma triangular. A parte se puede ver como la forma triangular isósceles y escalena da el mismo resultado por lo que se hará la aplicación de las dos formas en el modelo ETMS debido a que da mejor resultados que el EPS.

Model	Shape	SIMAR-1042072						SIMAR-2083039					
		Damage			Overtopping			Damage			Overtopping		
		R2	MSE	MSE 3rd_OS	R2	MSE	MSE 3rd_OS	R2	MSE	MSE 3rd_OS	R2	MSE	MSE 3rd_OS
EDS	Isosceles trian.	0.941	0.100	0.510	0.910	864	2313	0.966	0.052	0.159	0.954	673	932
	Scalene trian.	0.941	0.100	0.512	0.910	864	2308	0.966	0.052	0.160	0.954	673	935
	Parabola	0.929	0.245	4.989	0.888	2637	46,176	0.888	0.359	6.275	0.865	4161	39,128
	Trapezium	0.925	0.259	5.821	0.902	2139	40,107	0.920	0.222	3.413	0.914	2099	11,557
	Trapezoid	0.977	0.054	0.296	0.957	635	3644	0.969	0.063	0.469	0.945	1111	3667
EMS	Isosceles trian.	0.984	0.029	0.384	0.990	118	1240	0.992	0.012	0.093	0.997	51	144
	Scalene trian.	0.984	0.029	0.385	0.990	118	1236	0.992	0.012	0.094	0.997	51	144
	Parabola	0.980	0.053	0.959	0.986	221	2963	0.962	0.091	2.054	0.993	129	2242
	Trapezium	0.960	0.120	2.582	0.968	561	9341	0.956	0.106	1.811	0.982	337	1614
	Trapezoid	0.992	0.017	0.030	0.993	101	89	0.993	0.013	0.177	0.996	64	557
ENWS	Isosceles trian.	0.945	0.102	0.176	0.926	789	410	0.966	0.061	0.268	0.953	800	1767
	Scalene trian.	0.946	0.101	0.175	0.926	789	410	0.965	0.061	0.269	0.953	800	1767
	Parabola	0.902	0.379	8.478	0.845	4343	89,908	0.848	0.577	11.501	0.806	7520	100,512
	Trapezium	0.920	0.288	6.867	0.892	2507	54,366	0.906	0.285	5.789	0.896	2846	33,922
	Trapezoid	0.968	0.082	0.968	0.949	836	11,742	0.955	0.101	1.405	0.928	1665	16,145

Tabla 6. Comparativa de las posibles formas por cada modelo teórico

Modelo 1 EPS

El modelo EPS se describe por los siguientes parámetros recogidos en el Anejo.

a=4.65 m

duración= 74h

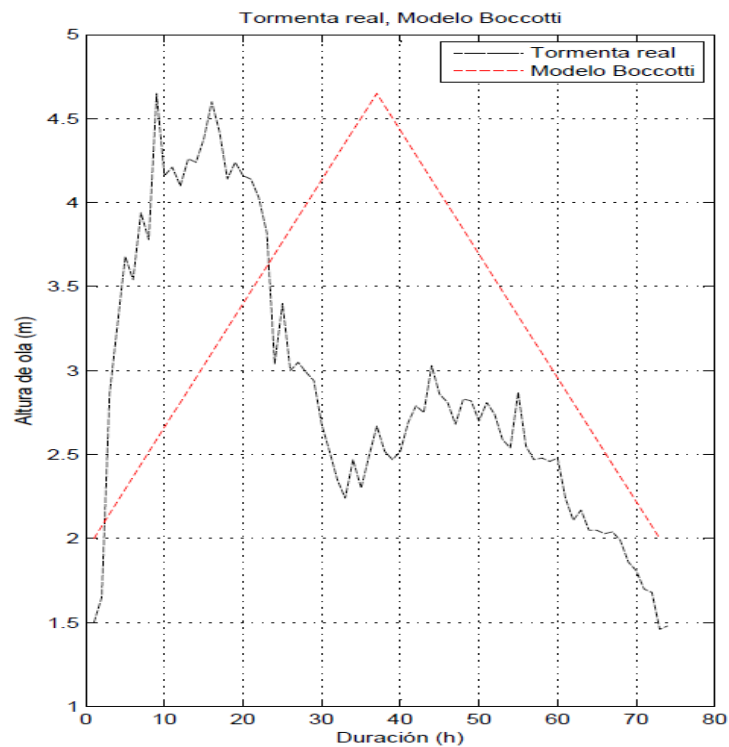


Ilustración 15. Representación modelo Boccotti a partir de la tormenta real.

Como se puede, el modelo teórico basado en la propuesta de Boccotti 2000, no se adapta a la forma de una tormenta del mediterraneo, ya que la mayoría de la energía de esta se concentra en el medio cuando la tormenta real ya se esta disipando, es por eso que se decide que no será necesario comprobarla de forma practica.

Modelo 2 ETMS

La modelo ETMS de foma triangular isosceles tiene los siguientes paramentros repersentados en el Anejo

Hspeak=4,65m

Duración=69h

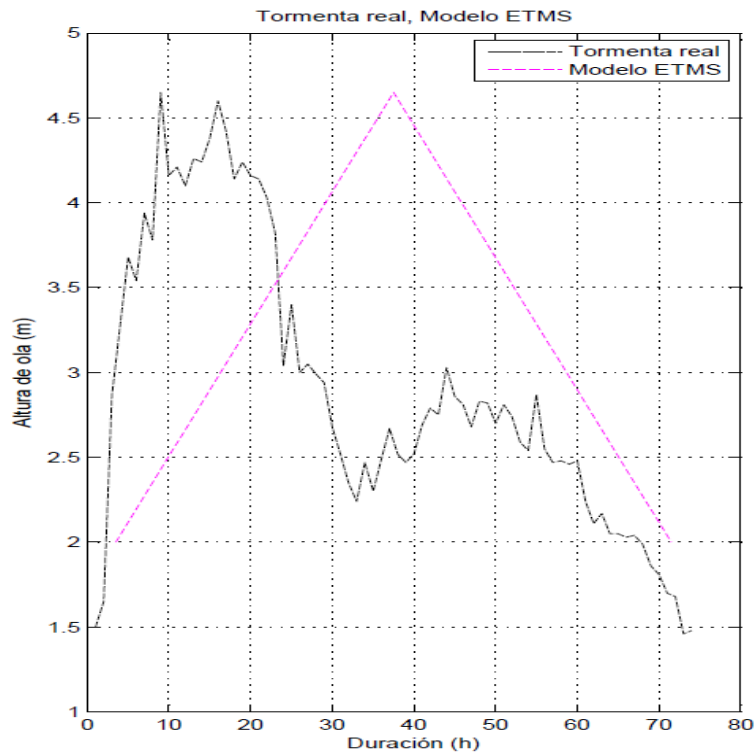


Ilustración 16. Representación del modelo ETMS triangular isósceles

La modelo ETMS de foma triangular escaleno tiene los siguientes paramentros
reperesentados en el anejo

Hspeak=4,65m

Duración=69h

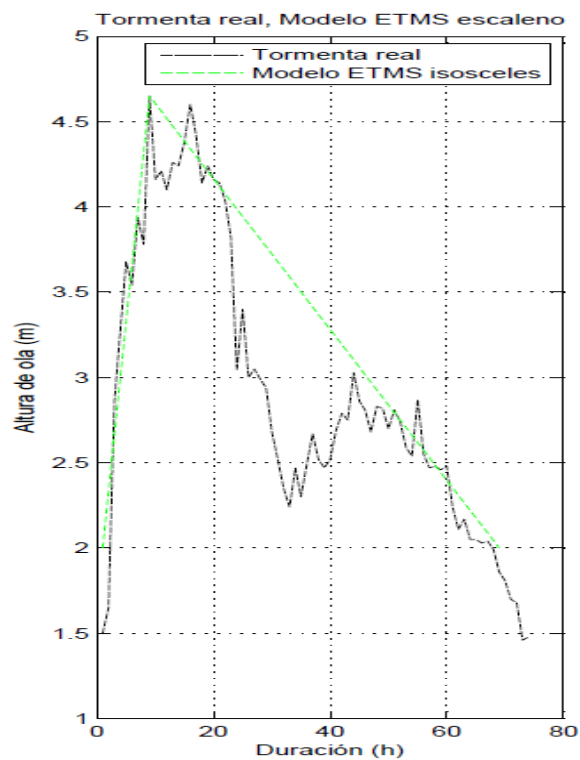


Ilustración 17. Representación del modelo ETMS triangular escaleno

II-4-c. Tormenta real

El oleaje de estudio corresponde a los datos de cada hora obtenidos de la boya de Blanes, 41,64°N y 2,81°E y 74 m de profundidad, a partir de estos datos según la definición de tormenta de la R.O.M para el sector VIII, (valores de altura de ola superiores de 2m), se obtiene la tormenta de la fig 18. (Los valores están en el apéndice X).

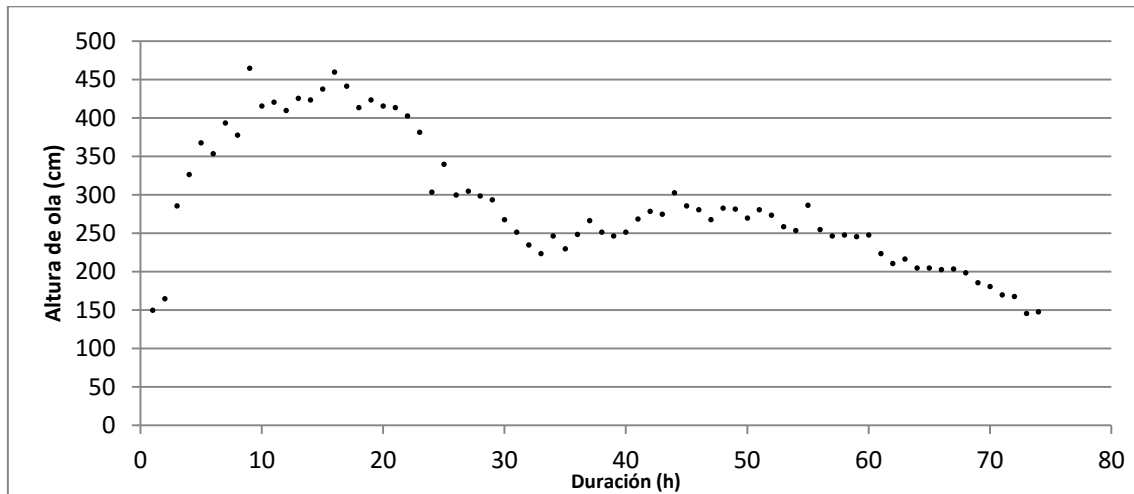


Ilustración 18. Tormenta de diciembre de 2008, datos obtenidos de la boya de Blanes

Propagación

Para poder representar el oleaje en la pala del canal CIEMito se hizo la propagación con la ayuda del software SWANONE, de la Universidad de Delft, este software permite hacer una propagación de oleajes irregulares, por lo que se asumirá que los estados del mar se corresponden a un modelo JONSWAP con una $\gamma=3,3$, por lo que se hará a partir de la propagación de espectros de energía, estos desde la profundidad de la boya hasta la profundidad real en la que se encuentra la pala.

Para el uso del software fue necesario la obtención del perfil desde la boya hasta la costa, fig. X, este perfil fue elaborado a partir de la WebApp de la página web <http://www.navionics.com/en/>.

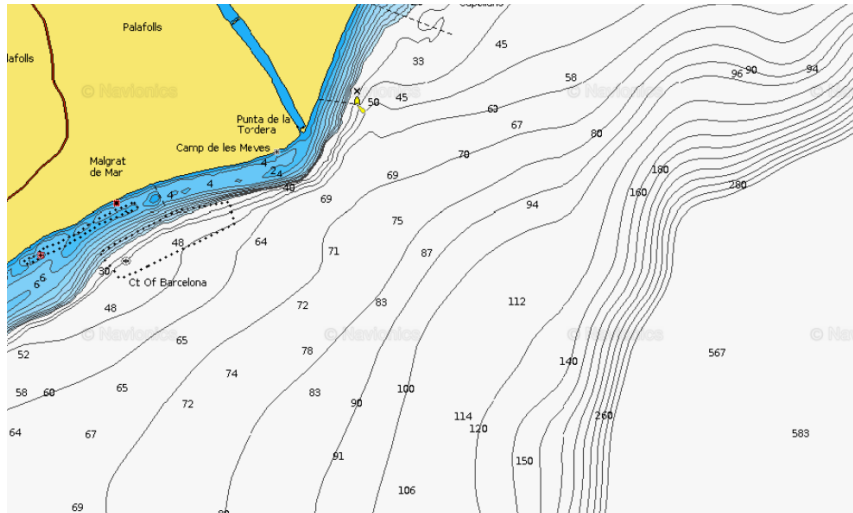


Ilustración 19. Altimetría obtenida de Navionics WebbApp

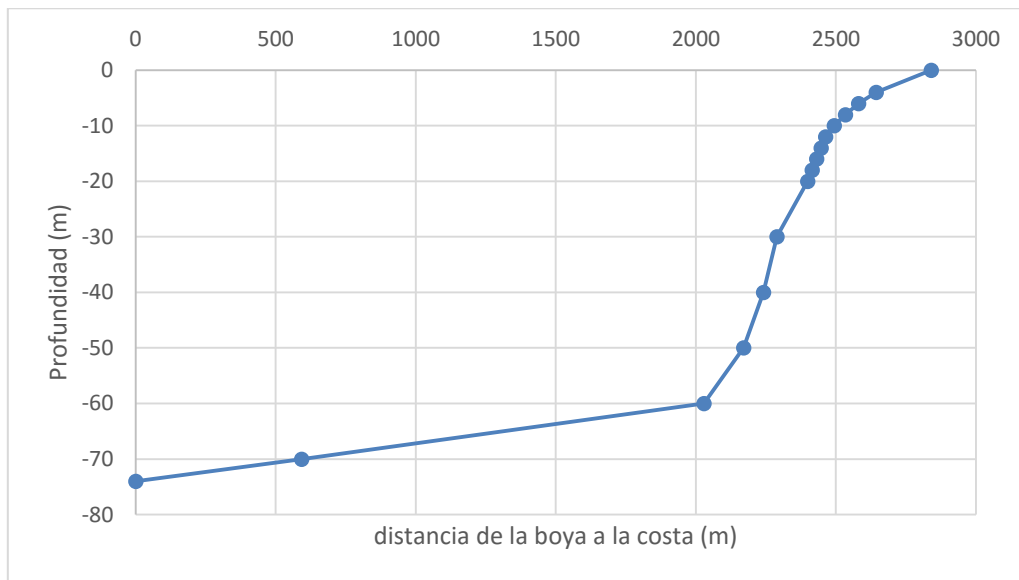


Ilustración 20. Perfil usado para el SWANOne

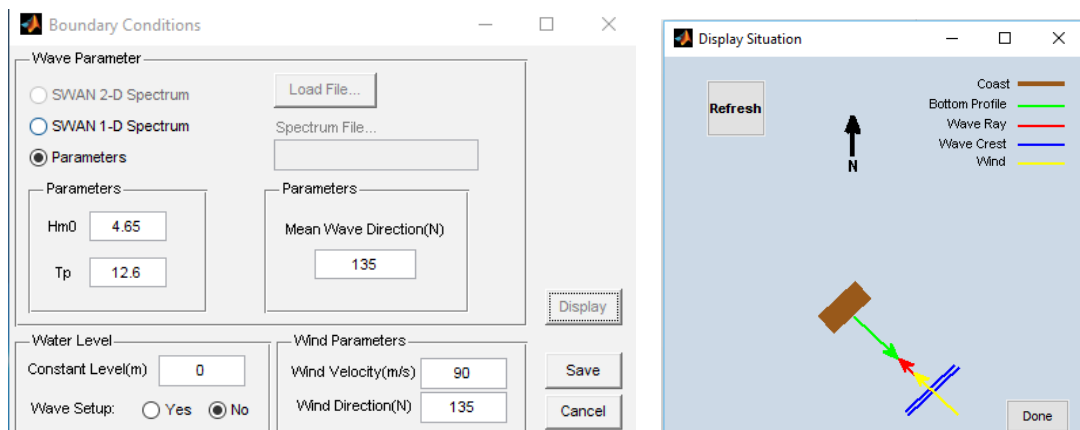


Ilustración 21. Izquierda Introducción de datos al SWANOne, derecha esquema de las componentes

II-5. Daño

II-5-a. Concepto de daño en obras marítimas

El daño en obras marítimas puede ser medido a partir del número desplazado de unidades o por la diferencia del perfil de las capas debido al área erosionada.

Para este estudio se tendrá en cuenta la definición de daño de van der Meer 1988b, que es definido como el daño relativo, N_{od} que es el número de unidades desplazadas en una anchura de un diámetro nominal (D_n), a lo largo del eje longitudinal del dique. Esta definición no cuenta con los desplazamientos inferiores a D_n ni con los asentamientos de las unidades que se desplazan a diferencia de otras fórmulas del mismo autor

$$N_{od} = \frac{\text{Numero de unidades desplazadas}}{\left(\frac{\text{anchura de la seccion testeada}}{D_n}\right)}$$

Damage level by N_{od} for two-layer armor (van der Meer 1988)

Unit	Slope	Initial damage	Intermediate damage	Failure
Cube	1:1.5	0		2
Tetrapods	1:1.5	0		1.5
Accropode	1:1.33	0		0.5

Tabla 7. Niveles de N_{od} para diferentes tipos de manto principal (2 capas) (tabla VI-5-21 CEM)

II-5-b. Método para medir el daño

En la literatura actual se puede ver como el daño en un canal de investigación no solo se mide en N_{od} sino que también se mide con la diferencia de porosidad que sufre la estructura. Este segundo factor hace que el cálculo del daño de la estructura no solo sea el obtenido en la predicción para esa condición de temporal, sino que el daño se calculará a partir de la siguiente formula. Gómez-Martín y Medina 2014.

$$D_i = m * \left(1 - \frac{1 - p_i}{1 - p_{0i}}\right)$$

$$D_e = \sum_{i=1}^n D_i$$

Este método consiste en dividir virtualmente el manto principal en bandas horizontales cuya altura es m veces el lado de cubo, de forma que se puede obtener el daño de cada banda (D_i) por lo que el daño total es la integral de los daños de cada banda a la largo del talud.

La ventaja principal de este método es considerar la diferencia de porosidad por lo que también se cuenta con la más que probable compactación heterogénea del talud (Herrera M.P et al 2015).

III. PROPUESTA DE EJECUCIÓN Y TOMA DE DATOS.

Una vez se ha seleccionado el material que se va a necesitar para la ejecución del proyecto, se procederá a delimitar, en la pared del canal, el esquema a una altura de 16,7 cm del fondo del canal sobre la rampa para facilitar la construcción del dique. Una vez construido el dique y con la profundidad que le corresponde a la altura de la pala (30 cm) se procederá a una primera foto del dique (situación inicial). Con esta fotografía se dividirá el manto principal en bandas y se podrá distinguir la porosidad inicial de cada una de ellas.

Primero se llevará a cabo el ensayo de la tormenta real (valores en el Anejo), el procedimiento será repetitivo, al final de cada *step* se tomará una fotografía y se anotará el número de cubos que se han movido, estas anotaciones serán luego comprobadas con el soporte fotográfico, con lo que al final de cada *step*, se tendrá por un lado el Nod y al final de la tormenta se podrá calcular la porosidad final con lo que se tendrá el parámetro De, este valor se comparará con el valor N_{od} obtenido de las anotaciones y se podrá comprobar cuál de las dos formas es más útil para el cálculo del daño y cuál de los dos factores, variabilidad de la porosidad o desplazamientos, es más determinante. Al final de cada ensayo se comprobará mediante los datos obtenidos por las sondas si las alturas de olas generadas se corresponden con las alturas de ola que le hemos pedido al CIEMito. Para asegurarnos que los resultados son fiables se repetirán como mínimo, unas 5 veces y cada una de ellas se tendrá de rehacer el dique.

Los procedimientos de los dos modelos serán iguales que los de la tormenta real. Con el mismo número mínimo de repeticiones para cada uno de ellos. Con lo que al final se podría comprobar cuál de los dos modelos causa una parecida evolución del daño que la tormenta real.

IV. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El diseño de la estructura del experimento se basa en una reducción a un tercio de la propuesta por van der Meer (1988) en sus ensayos. El diseño final está constituido por un manto principal de cubos, 782 unidades, de 1,5 cm de lado y una densidad de 2,23 g/cm³, un filtro formado por áridos entre 6,3 y 9,0 mm, un núcleo de áridos entre 3,55 y 6,30 mm. La geometría del dique en talud presenta una berma de escolleras de 9,0 mm a 13,2 mm a pie de la estructura de 3,8 cm de longitud (fig 7).

La escala de trabajo resultante para la generación de averías y las capacidades de generación del CIEMito es de 1/80. Los errores a pequeña escala aumentan al ser extrapolados a prototipo por lo que se requiere una especial atención en la densidad del bloque, la porosidad global de la estructura y la densidad de colocación.

En referencia al aspecto de la densidad del bloque, se ha de tener un control exhaustivo a la hora de su elaboración para que sea (2,23g/cm³) y se mantenga la densidad relativa.

En referencia al aspecto de la porosidad real, se han de hacer ajustes en el tamaño del árido, para que se mantenga la relación entre porosidades globales del modelo físico y del prototipo, evitando el incremento de paramentos que afectan a la estabilidad.

Por último en referencia al aspecto de la densidad de colocación se necesita controlar la aleatoriedad a partir de la densidad de colocación adimensional (*packing density*), Para el diseño experimental a realizar, se ha de mantener $\phi=1,17$ CIRIA 2007.

Los modelos teóricos planteados y sus formas se han obtenido respectivamente de los artículos de Hidalgo, M. et al. (2014) e Hidalgo, M. et al. (2015) y han sido ajustados a el temporal de Diciembre de 2008 que causó graves daños en distintas instalaciones portuarias (Interantional Coastal engineering, 2014 Gracia et al. 2014).

Los resultados muestran (Tabla 5) como las tormentas sintéticas que mejor se asemejan a la zona del Mediterráneo son el EPS con $\lambda=1$ y el ETMS. Según la tabla 6. Las formas que se adaptan mejor a un temporal en el mediterráneo son las triangulares, isósceles y escaleno.

En el proceso de ajuste de las tormentas sintéticas la forma isósceles no representa de forma adecuada la tormenta real. A parte, la dificultad a la hora de ajustar el modelo EPS a una forma que no sea triangular isósceles, se descartó para su comprobación experimental en el CIEMito. Por lo que en el diseño del experimento, se comprobará únicamente el modelo ETMS pero también si con las dos formas (escaleno e isósceles) se obtiene la misma evolución del daño.

En la construcción de bloques se planteó el uso de distintos materiales: yeso cristalino, mortero y resinas. Se descartó el yeso cristalino por su baja densidad y alta solubilidad, el elevado costes de las resinas, 2€/bloque, hizo inviable su compra. Finalmente se utilizó mortero con una dosificación según la tabla 3.

El estudio granulométrico del material presente en el laboratorio, permite saber entre que tamices se encontraría las diferentes capas del dique partiendo de un peso conocido (tabla 2), a parte se ha de segregar aquel material que sea de forma redondeada que hace que se reduzca la fricción entre superficie y ayude a movimientos no deseados del manto principal.

En la el artículo de Gómez-Martín y Medina (2014) se explica como el parámetro N_{od} de la fórmula de van der Meer no representa bien el daño real de la estructura en los canales de investigación, y presenta una forma alternativa de poder medir el daño.

El nuevo método divide en bandas el manto principal y calcula el daño de cada una de ellas a partir de la diferencia de porosidades para después, sumar el daño de cada franja y encontrar el daño total de la estructura. Igualmente se propone medir el N_{od} en el experimento y así diferenciar los dos tipos de daño.

El trabajo realizado lleva a las siguientes recomendaciones de elaboración del ensayo:

- La elaboración de cubos debe ser exhaustiva con un mortero de densidad 2,23g/cm³ controlando en todo momento su proceso de elaboración.
- El daño de la estructura debe realizarse a partir de las propuestas de Gómez-Martín y Medina (2014),
- El tintado de los elementos con distintos colores facilita la evaluación del daño.
- Se ha de segregar aquel árido de forma redondeada para no reducir la fricción entre manto principal y filtro.
- La densidad de colocación ha de ser la fijada en el diseño.

Respecto al análisis del temporal sintético de diciembre de 2008 se observa:

- La dificultad de aplicar Boccotti (2000) a cualquier temporal que no tenga una forma triangular definida.
- ETMS escaleno se adapta de forma adecuada a la especial configuración del temporal de Diciembre de 2008.

V. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Tomando como punto de partida la realización de los ensayos que han sido predimensionados en el trabajo se plantean una serie de cuestiones a investigar en detalle:

- El trabajo se ha detectado la importancia del packing density en los resultados finales. Por ello se debería realizar la batería de ensayos inicial con distintos ratios de empaquetamiento. Este aspecto es de gran importancia puesto que refleja el proceso constructivo de la obra y tiene una gran repercusión en su coste. Ahondar en el conocimiento de la evolución del daño bajo distintos valores packing density ha de permitir la mejora en el diseño de este tipo de estructuras.
- El efecto de las variaciones del nivel medio del mar como reflejo de escenarios futuros de cambio climático. Si bien las condiciones hidrodinámicas són las propuestas en el estudio, se desconoce cuál será la respuesta del daño frente a calados superiores. Se trata pues de realizar los ensayos bajo diferentes condiciones de nivel medio en correspondencia con las predicciones propuestas por el IPCC (Intergovernmental Pannel for Climatic Change) en su informe AR5. Los resultados proporcionarán una información muy valiosa sobre la respuesta del daño bajo condiciones de cambio climático.
- Adicionalmente, la mejora de las técnicas de media del daño resultan evidentes y fundamentales para la propia ejecución del estudio. Se recomienda explorar técnicas indirectas de medida del daño como por ejemplo restitución fotogramétrica.

VI. REFERENCIAS

- **Boccotti, P. (2000).** Wave Mechanics for Ocean Engineering. ELSEVIER SCIENCE B.V.
- **CIRIA/CUR 2017** “*Manual of the use of rock in coastal and shoreline engineering*”. 2nd edition , London, UK
- **Corbella, S., & Stretch, D. D. 2012a.** Multivariate return periods of sea storms for coastal erosion risk assessment. Natural Hazards and Earth System Science, 12(8), 2699–2708. doi:10.5194/nhess-12-2699-2012
- **De Michele, C., Salvadori, G., Passoni, G., & Vezzoli, R. 2007.** A multivariate model of sea storms using copulas. Coastal Engineering, 54(10), 734–751. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.05.007
- **García Rubia, F. J., 2006** “*Damage analysis in Rubble Mound Breakwater model tests*”, Master Thesis
- **Herrera, Maria P., Molines, J., Medina, J.R., 2015** “*Colocación de bloques cúbicos y estabilidad hidráulica del manto principal.*” Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- **Martín, F. Martínez, C. Lomónaco, P. Vidal, C. 2002** “A new procedure for the scaling of core material in rubble mound breakwater model tests” Proceedings ICCE
- **Martín-Hidalgo, M., Martín-Soldevilla, M^aJ., Negro, V. López-Gutiérrez, J.S., Aberturas, P. 2014.** “*Storm evolution characterization for analysing stone armour damage progression*”. Proceeding of Coastal Engineering, vol. 85, pp 1-11
- **Martín-Hidalgo, M., Martín-Soldevilla, M^aJ., Negro, V. López-Gutiérrez, J.S., Aberturas, P., 2015.** “*Improvement of theoretical storm characterization for different climate conditions.*” Proceeding of Coastal Engineering, vol. 96, pp 71-80.
- **Medina, J.R., Molines, J., Gómez-Martín, M.E. 2014** “*Influence of armour porosity on the hydraulic stability of cube armour layer.*” Proceedings of Ocean Engineering, vol 88, p.p. 289-297.
- **Recomendaciones de Obras Marítimas 0.1-09** Part 1 calculation and Project factors. Climate Agents. Puertos del Estado,
- **U.S.A.C.E, Coastal Engineering Manual 2008,**
- **van der Meer, J.W. 1988b.** “*Stability of cubes, Tetrapods and Accropode*” Proceedings of Coasts, Marine Structures and Breakwaters 1988, ICE, Thomas Telford LTd., pp 71-80

- **van der Meer, J.W.** 1999. "*Design of concrete armour layers*". Proceedings of the 3rd Coastal Structures International Conference. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 213-239
- **Vicente Gracia, Manuel García-León, Agustín Sánchez-Arcilla, Jeremy Gault, Pere Oller, Juan Fernández, Abdel Sairouni, Elena Cristofori and Ramon Toldrà** 2014 "New generation of early warning system for coastal risk. The ICOAST PROJECT" Proceedings of International Coastal engineering
- *Anàlisi extremal Bayessiana de tempestes d'onatge a la costa catalana*, UPC,
Disponible en:
[<http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6060/04.pdf?sequence=5&isAllowed=y>; última visita: 27/05/2016]

VII. NOMENCLATURA Y SIMBOLOGIA

D_i :	Daño relativo a cada banda
D_e :	Daño total del manto principal
D_{50} :	Diámetro medio de toda la muestra
g :	Gravedad
h :	Profundidad
h_b :	Profundidad por encima de la berma
H :	Altura de ola
H_s :	Altura de ola significativa
I :	Intensidad eléctrica
k :	Numero de olas $k=2\pi/L$
k_Δ :	Factor de capa
L_m :	Longitud (m=modelo/p=prototipo)
M :	Masa
M_{50} :	Masa media de toda la muestra
n :	Numero de capas
N_{od} :	Daño según van der Meer
N_s :	Coeficiente de estabilidad
P :	Porosidad
P_i :	Porosidad inicial
P_{oi} :	Porosidad final
R :	Resistencia eléctrica
S_o :	Carrera máxima del pistón
T_m :	Periodo medio
U_m :	Velocidad (m=modelo/p=prototipo)
W :	Peso
W_{50} :	Peso medio de toda la muestra
Δ :	densidad relativa $\Delta=\rho_r/\rho_w-1$
γ :	factor de realce del pico de la distribución JONSWAP
γ :	Índice de rotura del oleaje
ϕ :	densidad de colocación adimensional
φ :	Número de elementos/m ²
λ :	Factor de escala
ρ :	Densidad